



Press Release

平成 29 年 5 月 31 日

報道機関 各位

東北大学大学院工学研究科
内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担当)
科学技術振興機構(JST)

反強磁性体スピンの反転に必要な電圧を大幅低減 — 交換結合ヘテロ構造電圧書き込み磁気記録デバイスに道筋—

【発表のポイント】

- 漂遊磁界を発生しない反強磁性体スピントロニクスが注目を集めている
- 強磁性体と反強磁性体の交換結合ヘテロ構造薄膜磁化の反転メカニズムを解明
- 反強磁性体スピンの反転に必要な電界を 2 桁低減することに成功
- 磁化の電圧制御を用いる超低消費電力磁気記録デバイスへの適用に道筋

【概要】

内閣府総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム ImPACT (プログラム・マネージャー: 佐橋政司)の一環として、東北大学大学院工学研究科の佐橋政司教授と野崎友大准教授らは、クロム酸化物の反強磁性スピン^{注1}の向きを低電圧で 180 度反転させることに成功し、反転に必要な電界の大きさを 2 桁低減する技術を開発しました。本研究成果によって、数十ナノメートル^{注2}のクロム酸化物反強磁性体薄膜を用い、1V 以下の低電圧で反強磁性スピンを反転させることが可能となり、スピンの電圧制御を用いた反強磁性体スピントロニクス^{注3}の超低消費電力磁気記録デバイスへの適用が現実的になりました。本研究の成果を磁気メモリやハードディスクドライブなどに適用することにより、漂遊磁界^{注4}の抑制による高記録密度化や書き込み時のジュール発熱の抑制による、より一層の低消費電力化が期待されます。

研究の内容は 2017 年 6 月 2 日に「Japanese Journal of Applied Physics Rapid Communications」誌に掲載されます。本研究は、内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現(佐橋政司プログラムマネージャー)」の一環としてなされたものです。

【研究の背景と経緯】

スマートフォン、タブレットなどの情報端末の進化により、情報通信社会はいよいよクラウド化社会へと進み、クラウド、ソーシャルデータ、ビッグデータ、そしてモノのインターネット (Internet of Things:IoT) や人工知能 (Artificial Intelligence:AI) の普及により、情報流通量と消費電力の増大がすでに起こり始めています。流通する情報量は 2025 年には 2006 年度比で 200 倍以上になると言われており、IoT や AI の普及とも相まって、膨大な消費電力が生じることが予想されることから情報機器のより一層の低消費電力化が強く求められています。

これまでの情報記録デバイスでは、ハードディスクドライブ (HDD) や磁気メモリに代表されるように、Co (コバルト) や Fe (鉄) などの強磁性体から成る記録 (記憶) 層に、電流 (スピントランスファートルク^{注5}) や磁界で(0,1)のデジタル情報、すなわち磁化の反転領域を記録 (記憶) する方法が用いられています。しかしながら、これらはいずれも強磁性体磁化の電流駆動による磁化反転を利用するもので、他の抵抗変化型メモリ同様、電流によるジュール発熱に起因した電力損失を免れることはできず、大きな課題として残されています。また、記録 (記憶) 層に強磁性体を用いるこれまでの情報記録デバイスでは、漂遊磁界の問題が高記録密度化への壁となっています。

これらの課題の解決方法として、東北大学大学院工学研究科の佐橋政司教授らのグループは、いち早くクロム酸化物反強磁性体を情報の記録 (記憶) 層に用いることに着目し、世界で初めてクロム酸化物反強磁性体薄膜における反強磁性スピンの電圧によるスピン反転を実験検証することにすでに成功しています [Applied Physics Letters Vol. 104, 152409 (2014)、Applied Physics Letters Vol. 106, 132407 (2015)]。また、最近ではクロム酸化物反強磁性体薄膜には、寄生強磁性成分 (弱い強磁性) が発現することを見出し、寄生強磁性成分を取り込んだ強磁性体/反強磁性体交換結合^{注6}ヘテロ構造の自由エネルギーの解析から、この寄生強磁性成分由来のゼーマンエネルギー^{注7}が、クロム酸化物反強磁性体薄膜の極薄化を拒む交換結合エネルギーの増大を相殺するモデルを提唱しています [Physical Review B Vol.95, 144423 (2017)]。

クロム酸化物は、室温近傍まで電気磁気効果^{注8}を示す限られた物質として古くから知られてきた反強磁性体物質です。この物質に電界と磁界を同時に印可すると、その向きが平行か反平行かによって、クロム酸化物の反強磁性スピンの向きを制御することができます。反強磁性スピンは隣り合うスピンの反対方向を向いているため、全体として強磁性体のような磁化の信号を得ることはできませんが、このクロム酸化物と Co などの強磁性体をヘテロ接合することによって、交換結合と呼ばれる磁気的な結合が生じ、反強磁性スピンの向きが強磁性体のスピンの向きに転写され、強磁性体の磁化を通して反強磁性スピンの向き (反転) を磁化の信号として読み取ることができるようになります (図 1)。

佐橋政司教授らのグループでは、クロム酸化物反強磁性体薄膜と Co 強磁性体薄膜から成るヘテロ構造を用いて、電圧による反強磁性スピンの制御に取り組み、世界に先駆けてスパッタリング法で作製した数百ナノメートル程度のクロム酸化物薄膜と Co との交換結合ヘテロ接合において、電圧による反強磁性スピンの反転制御を実験検証することに成功しましたが、クロム酸化物薄膜の膜厚が薄くなるほどこの反転に必要な電圧が増大することが明らかとなり、大きな問題となっていました。

本研究成果は、モデル提唱を基に、この問題の解決法を実験的に示し、磁化の電圧制御を用

いる超低消費電力磁気記録デバイスへの適用に道筋をつけたものです。

【研究成果】

今回、東北大学は Co などの強磁性体薄膜とのヘテロ接合において、記録(記憶)層に用いるクロム酸化物反強磁性体薄膜の膜厚が薄くなるほど反強磁性スピンの反転に必要な電圧が増大してしまうという問題を解決するため、その原因をエネルギーバランスの観点から調べ、反強磁性スピンの反転有無を磁化信号として読み取るために用いる強磁性体薄膜との間の交換結合エネルギーが電圧による反強磁性スピンの反転の妨げになっていることを突き止めました。また、反強磁性スピンの反転に必要なエネルギーバランスの関係を調べ、反強磁性体であるクロム酸化物薄膜に弱い強磁性磁化成分を付与することで、反強磁性スピンの反転がアシストされることを見出し、交換結合ヘテロ構造を最適化することで、反強磁性スピンの反転に必要な電界を大幅に低減することが可能であることを発見しました(図 2)。さらに、スパッタリング法^{注9}で作製したクロム酸化物薄膜に生じる弱い強磁性磁化成分を利用し、反強磁性スピンの反転に必要な電界を 2 桁低減できることを実験検証することに成功しました(図 3)。これにより磁気記録デバイスへの適用に必要な数十ナノメートルのクロム酸化物反強磁性体薄膜の反強磁性スピンの低電圧制御が可能となり、磁気メモリなどのスピントロニクスデバイスへの応用が現実的なものとなりました。

クロム酸化物反強磁性体を示す室温近傍での電気磁気効果は、これまでも興味深い現象と認識されてきたものの、その効果が薄膜では観測されなかったり、観測できる温度がごく低温に限られていたりしたことで、実応用に供するものではありませんでした。本研究で、スパッタリング法という実用に適した方法で作製した薄膜を用いて室温付近で反強磁性スピンの電圧制御を達成したこと、磁気記録デバイスへの適用に必要な数十ナノメートルの薄いクロム酸化物薄膜を用いても 1V 以下の電圧で反強磁性スピンの反転が可能であることを示したことにより、初めて電気磁気効果の実応用への道が開けました。磁化の電圧制御は他の方式でも可能ですが、本方式は電圧を印可した方向に反強磁性スピンを反転させる選択的双方向制御を可能とするシンプルな方式であり、その制御性の容易さからより広範囲な応用展開が期待されます。

【今後の展開】

今後は、クロム酸化物反強磁性体薄膜に寄生する弱い強磁性磁化の発現メカニズムや起源の解明を現在既に知見が得られている元素ドーピングの効果も含めて進めるなど、一層の材料特性の改善(動作温度の向上や、より低磁界下での反転電圧のさらなる低減なども含む)を行うとともに、磁気メモリデバイス実現に向けたデバイスの設計開発などに注力して行きます。

なお、クロム酸化物反強磁性体薄膜に寄生する弱い強磁性磁化の発現と元素ドーピング効果については、近く著名な学術論文誌に投稿する予定です。

■佐橋政司プログラム・マネージャーのコメント■



本成果は、平成 26 年度～平成 28 年度の間、ImPACT 佐橋プログラム、交差相関電圧書込み磁気記録プロジェクト[プロジェクトリーダー：佐橋政司(東北大)]の研究開発においてなされたもので、電界(電圧)で反強磁性スピンを操作可能な電気磁気効果を示す物質として知られていたクロム酸化物反強磁性体の薄膜電気磁気効果の発現を確認するとともに、薄膜において、特異的に発現する弱い寄生強磁性磁化成分を利用

することで、Co などの強磁性体薄膜との交換結合ヘテロ構造において、1V 以下の低電圧で反強磁性スピンの反転が可能であることを実験的に示すなど、電圧を印可した方向に反強磁性スピンを反転させる選択的雙方向制御を可能とする電気磁気効果の実応用への道を開いた成果で、その意義は極めて大きいと言える。

◆特記事項

本成果は、以下の事業・研究プロジェクトによって得られました。

● 内閣府 革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)

<http://www.jst.go.jp/impact/>

プログラム・マネージャー：佐橋 政司

研究開発プログラム：無充電で長時間使用できる究極のエコ IT 機器の実現

研究開発課題：高性能電気磁気効果薄膜材料の開発

研究開発責任者：平成 26 年度～平成 27 年度 佐橋政司(東北大学 大学院工学研究科 教授・リサーチプロフェッサー)、平成 28 年度 野崎友大(東北大学大学院工学研究科 准教授)

研究期間：平成 26 年度～平成 28 年度

本研究開発課題では、電圧を印可した方向に反強磁性スピンを反転させる選択的雙方向制御を可能とする電気磁気効果の磁気記録デバイスへの適用のため、高性能電気磁気効果薄膜材料の開発に取り組みました。

【参考図】

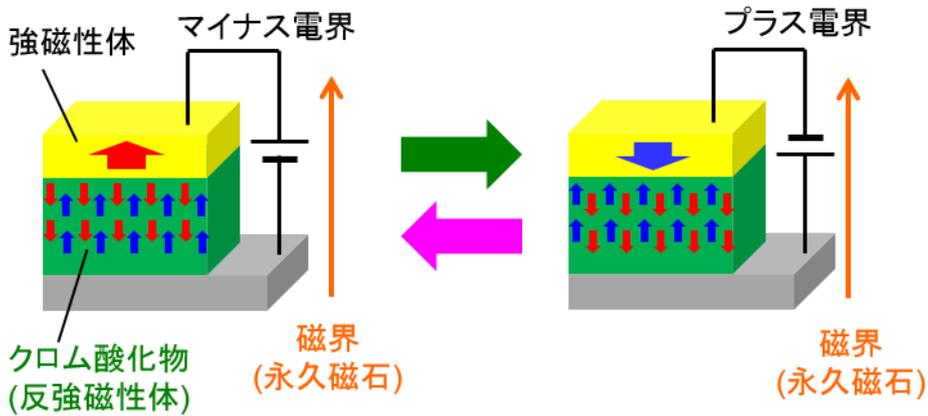


図 1. クロム酸化物の電気磁気効果を用いた反強磁性スピンの反転と強磁性体への転写の模式図。永久磁石で印可した磁界と平行または反平行に電界を印可することで反強磁性スピンの向きを制御することができ、反強磁性スピンの向きは交換結合を介して隣接する強磁性体の磁化の信号として読み取ることができる。

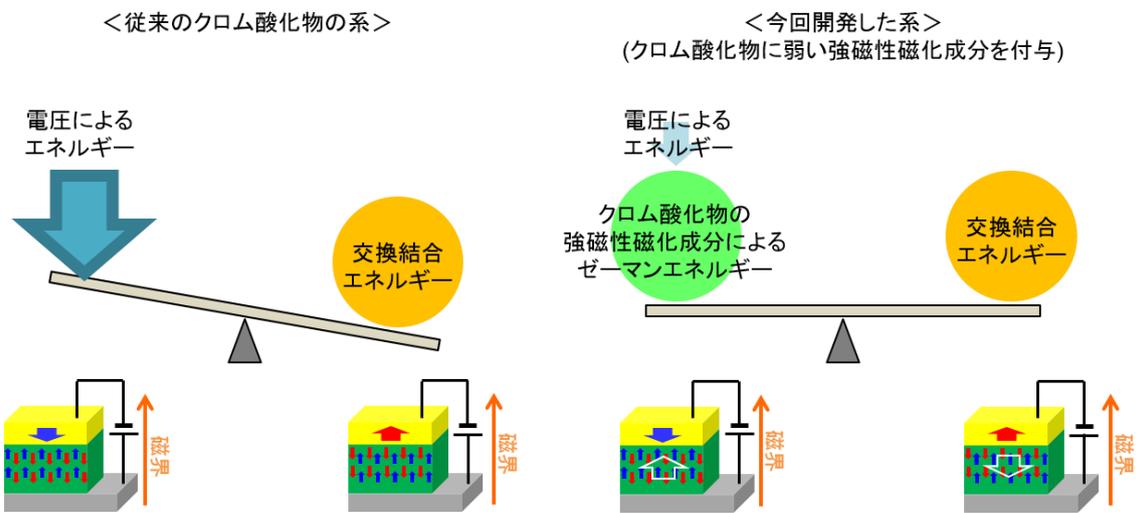


図 2. クロム酸化物の反強磁性スピンの反転に必要なエネルギーバランスの関係図。従来のクロム酸化物に強磁性磁化成分が存在しない系(左図)では、「交換結合エネルギー」より大きな「電圧によるエネルギー」を発生させないと反強磁性スピンの反転が起こらない。今回開発したクロム酸化物に弱い強磁性磁化成分を付与した系(右図)では、「クロム酸化物の強磁性磁化成分によるゼーマンエネルギー」が「交換結合エネルギー」と釣り合うため、小さな「電圧によるエネルギー」で反強磁性スピンの反転を起こすことができる。

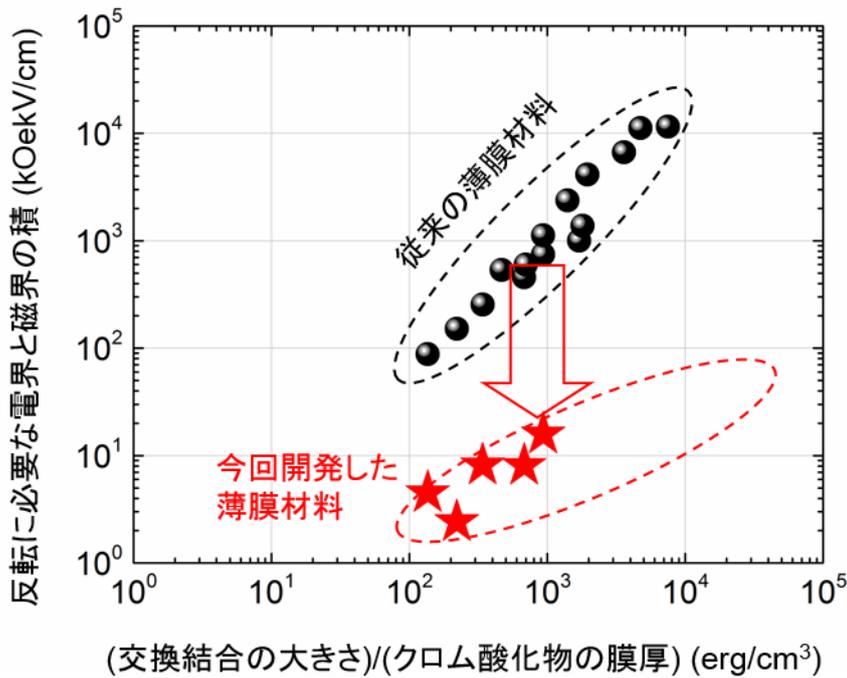
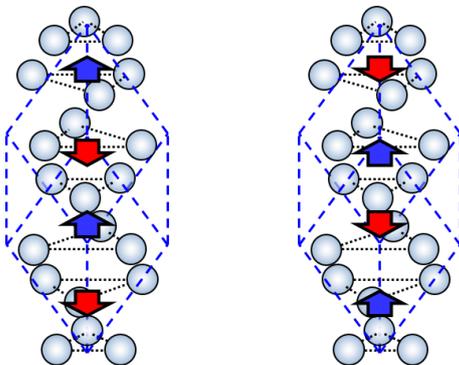


図 3. 反強磁性スピン反転に必要な電界と磁界の積と交換結合の大きさ、クロム酸化物の膜厚の関係。従来のクロム酸化物薄膜材料では、交換結合の大きさが大きくなるほど、またクロム酸化物の膜厚が薄くなるほど反転に必要な電界が増加してしまいましたが、今回開発した材料では 2 桁の反転電界の低減を実現し、また、クロム酸化物の膜厚が小さくなくても反転電界がほとんど増加しないという結果を得た。これにより、1V 以下の小さな電圧で反転が可能となった。

【用語解説】

注1 反強磁性スピン

反強磁性体は隣り合うスピンの向きが反対方向に向いているため、全体として磁化を検出することはできないが、区別できる状態が存在する。クロム酸化物の場合、↑↓↑↓と↓↑↓↑という二つの反強磁性スピンの状態を持ち、この二つの状態は電気磁気効果を使うことで反転させることができる。



注 2 ナノメートル

10 億分の 1 メートル。1 ナノメートルは原子数個分の大きさ。

注 3 スピントロニクス

これまでエレクトロニクス技術で使われてきた電荷に加えて、電子が持つ磁石としての性質である“スピン”を利用することによって、これまで実現できなかった新しい機能を持つ電子デバイスを実現する技術をスピントロニクスと呼ぶ。磁気メモリやストレージデバイス、センサなどに用いられてきた。

注 4 漂遊磁界

強磁性体から出ている磁界のこと。強磁性体から成るハードディスクドライブや磁気メモリでは、記録密度を上げていくとこの漂遊磁界が隣の記録(記憶)層に作用し、情報を誤って書き換えてしまうことが問題となっている。

注 5 スピントランスファートルク

伝導電子が持つスピンによって生じる、強磁性体を反転させることができる力のこと。このスピントランスファートルクを用いると、磁界を使うよりも小さいエネルギーで磁化の反転を引き起こすことができる。

注 6 交換結合

強磁性体材料と反強磁性体材料を積層したときに、界面のスピンに磁気的な結合が生じ、強磁性体の磁化の方向が反強磁性体スピンによって固定される現象。これまで、ハードディスクドライブの読み出しヘッドにおいて、強磁性体の磁化を固定するという静的な方法で用いられてきた。近年では、本研究のように、反強磁性スピンの反転を利用して強磁性体の磁化を反転させるというような動的な方法での利用が行われ始めている。

注 7 ゼーマンエネルギー

強磁性体など磁化をもつ物質に磁場を印可すると、磁化が磁場の方向を向こうとする力のこと。

注 8 電気磁気効果

一般に、物質の磁化は磁場の印可によって、電気分極は電界の印可によって誘起されるが、特殊な材料系では、電界(磁場)の印可によって磁化(電気分極)を誘起することができる。この性質を電気磁気効果という。電気磁気効果を用いると、電界と磁界の同時印可により、反強磁性スピンの方向を制御することもできる。

注 9 スパッタリング法

薄膜を形成する方法の一つ。アルゴンなどのガスイオン原子をプラズマ化し、ターゲット材

料に当てることで、表面からターゲットを構成する原子や分子が叩き出され、この叩き出された原子や分子を基板上に付着させることで薄膜を形成する方法。薄膜を形成する速度が早く、実応用で使われる技術である。

【論文題目】

Magnetoelectric switching energy in Cr₂O₃/Pt/Co perpendicular exchange coupled thin film system with small Cr₂O₃ magnetization

掲載誌: Japanese Journal of Applied Physics Rapid Communications, (2017)

【問い合わせ先】

<研究に関すること>

東北大学大学院工学研究科

担当: 佐橋政司(教授・リサーチプロフェッサー)

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

電話番号: 022-795-5203

E-mail: sahashi@ecei.tohoku.ac.jp

東北大学大学院工学研究科

担当: 野崎友大(准教授)

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

電話番号: 022-795-7067

E-mail: nozaki@ecei.tohoku.ac.jp

<ImPACT の事業に関すること>

内閣府 革新的研究開発推進プログラム担当室

〒100-8914 東京都千代田区永田町 1-6-1

TEL: 03-6257-1339

<ImPACT プログラム内容および PM に関すること>

科学技術振興機構 革新的研究開発推進室

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

Tel: 03-6380-9012 Fax: 03-6380-8263

E-mail: impact@jst.go.jp

<報道担当>

東北大学工学研究科・工学部情報広報室

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-4

Tel: 022-795-5898

E-mail: eng-pr@grp.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町 5 番地 3

Tel: 03-5214-8404 Fax: 03-5214-8432

E-mail: jstkoho@jst.go.jp